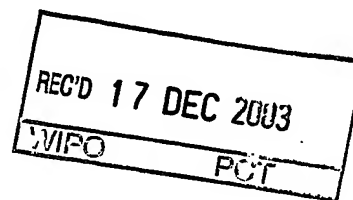


# BUNDESREPUBLIK DEUTSCHLAND

#2

## PRIORITY DOCUMENT

SUBMITTED OR TRANSMITTED IN  
COMPLIANCE WITH RULE 17.1(a) OR (b)



### Prioritätsbescheinigung über die Einreichung einer Patentanmeldung

**Aktenzeichen:** 102 52 129.8

**Anmeldetag:** 4. November 2002

**Anmelder/Inhaber:** Omicron Nano Technology GmbH, Taunusstein/DE;  
FOCUS GmbH Geräte zur Elektronen-Spektroskopie  
und Oberflächenanalytik, Hünstetten/DE

**Bezeichnung:** Energiefilter für elektrisch geladene Teilchen und  
Verwendung des Energiefilters

**IPC:** H 01 J 49/46

Die angehefteten Stücke sind eine richtige und genaue Wiedergabe der ur-  
sprünglichen Unterlagen dieser Patentanmeldung.

München, den 14. November 2003  
Deutsches Patent- und Markenamt  
Der Präsident  
Im Auftrag

Wehner

05.11.03



O 182

04. Nov. 2002

ME/ FE/FRI/AF

Omicron Nano Technology GmbH  
Limburger Straße 75  
65232 Taunusstein  
Deutschland

und

FOCUS GmbH Geräte zur Elektronen-  
Spektroskopie und Oberflächenanalytik  
Am Birkhecker Berg 20  
65510 Hünstetten-Görsroth

---

**Energiefilter für elektrisch geladene Teilchen und Verwendung des  
Energiefilters**

---

## **Energiefilter für elektrisch geladene Teilchen und Verwendung des Energiefilters**

### **Beschreibung**

Die Erfindung betrifft einen Energiefilter für elektrisch geladene Teilchen, wie Elektronen und Ionen, mit mindestens zwei toroidalen, hintereinander angeordneten Energieanalysatoren, wobei mindestens ein Energieanalysator in seiner Eintritts- und Austrittsebene jeweils eine Blende aufweist. Die Erfindung bezieht sich auch auf die Verwendung solcher Energiefilter.

Die Blenden in den Ein- und Austrittsebenen können sich senkrecht zur jeweiligen energiedispersiven Ebene erstreckende Schlitzblenden oder kreisförmige Blenden sein.

Unter Energiefilter werden bevorzugt abbildende Energiefilter verstanden. Die Verwendung abbildender Filter ist besonders vorteilhaft, wenn die parallel verarbeiteten Bildfelder mehr als 100 x 100 Bildelemente (pixels) enthalten. Die Registrierzeiten fallen dann wesentlich kürzer aus als in einem sequentiell die Probe abtastenden Spektrometer.

Energiefilter werden zum Beispiel in der Photoelektronenspektroskopie eingesetzt, die eine der wichtigsten Methoden zur quantitativen Elementanalyse von Oberflächen ist. Die Kombination von hoher Ortsauflösung zusammen mit der Messung der Photoelektronen- Energieverteilung wird Spektromikroskopie genannt. Um hohe Ortsauflösung zu erreichen, werden im Wesentlichen zwei verschiedene Methoden verwandt.

Bei der ersten Variante wird ein gebündelter Photonenstrahl über die Probe gerastert und die von dem so definierten Emissionsfleck kommenden Photoelektronen werden nach ihrer Energie analysiert.

Beim zweiten Verfahren wird der Photonenstrahl gerade genug fokussiert, um den Sichtbereich der Objektivlinse auszuleuchten. Die erzeugten Photoelektronen werden elektronenoptisch vergrößert abgebildet.

Um eine Karte der Elementverteilung oder der chemischen Bindung ableiten zu können, müssen die Photoelektronen nach ihrer kinetischen Energie analysiert werden. Für die Transmissionselektronenmikroskopie wurden dazu verschiedene Techniken entwickelt. Im Wesentlichen gibt es auch hier zwei unterschiedliche Prinzipien:

Es gibt Mikroskope, die alle Elektronen nutzen, um ein Bild zu erzeugen, wobei ein kleiner Teil der Elektronen durch einen Energieanalysator geht, um ein Spektrum von einem Teil des Bildes zu erzeugen. Ein anderer Teil der Mikroskope benutzt nur ein schmales Energieband, transportiert aber dafür ein komplettes Bild durch den Energieanalysator.

Die Elektronen werden durch elektrostatische oder magnetische Vorrichtungen gefiltert, die nur den Elektronen mit einer bestimmten Energie den Durchtritt ermöglichen. Die Intensität des resultierenden Strahls spiegelt die Konzentration eines vorliegenden chemischen Bestandteils der Probenoberfläche wieder. Bei diesem Verfahren soll die Ortsauflösung beim Durchtritt durch den Monochromator nicht verschlechtert werden.

Eine Reihe von Energieanalysatoren ist für diese Abbildungsfunktion entwickelt worden. Für die Energieanalyse ohne Abbildungsqualität hat der Halbkugelanalysator bei kommerziellen Geräten sich wegen seiner

guten Transmission und Energieauflösung in der Anwendung durchgesetzt.

Die möglichen Abbildungseigenschaften von elektrostatischen Energieanalysatoren wurden bereits vor vielen Jahren für Analysatoren mit allgemeinen toroidalen Feldern untersucht (B.Wannberg, G.Engdahl, A. Sköllermo, Imaging Properties of electrostatic Energy Analyzers with toroidal fields, J. Electron Spectr. Rel. Phenomen. 9 (1976), 111 – 127. Für ein toroidales Potential ist der Krümmungsradius in der einen Richtung ein anderer als senkrecht dazu. Als Spezialfall ist der Kugelkondensator mit einem Radienverhältnis gleich 1 in dieser verallgemeinerten Darstellung enthalten. Ein Zylinderkondensator ist nur in eine Richtung gekrümmt, sein Radienverhältnis ist gleich null. Es gibt Spektrometer, wo der Übergang zwischen den Feldformen kontinuierlich eingestellt werden kann, wie dies beispielsweise in K. Jost, Novel Design of a spherical electron spectrometer, J. Phys. E: Sci. Instr. 12, 1979, S. 1006 – 1012 beschrieben wird.

Aus der EP 0293924 B1 ist ein Elektronenmikroskop mit einem Energiefilter bekannt, der einen sphärischen Analysator mit einem halbkugelförmigen Aufbau umfasst. Um die Abbildungsqualität des Energiefilters zu verbessern, ist vor dem Eintrittsspalt ein aufwendiges Linsensystem angeordnet, um möglichst senkrecht auftreffende Elektronenstrahlen zu erzeugen. Für Elektronen, die am mittleren Bahnradius  $r_0 = x_0$  starten, gilt  $\alpha_0 = -\alpha_1$ , wobei  $\alpha_0$  den Eintrittswinkel und  $\alpha_1$  den Austrittswinkel aus dem Energiefilter bezeichnet.

Die Eintrittswinkel werden für diese Elektronen exakt auf den Austrittswinkel übertragen und zwar unabhängig von ihrer Energie.

Um diese Eigenschaft zu nutzen, wird ein vergrößertes Bild der Probe nicht in den Eintrittsschlitz des Analysators gelegt, sondern in den

Brennpunkt einer Linse, die vor der Schlitzblende des Analysators angebracht ist. Damit wird die Position des Bildes in Winkel transformiert. Die Eintrittsschlitzblende wird in den bildseitigen Brennpunkt der Linse gelegt.

Der Austrittsschlitz des Analysators selektiert den gewünschten Energiebereich. Eine weitere Linse hinter dem Analysator rekonstruiert aus dem transmittierten Winkelbild ein jetzt nach der Energie gefiltertes Ortsbild. Dieses kann weiter vergrößert werden und mit Hilfe eines Intensitätsverstärkers, z. B. einer Mikrokanalplatte, auf einem Leuchtschirm sichtbar gemacht werden.

Ein Elektronenspektrometer mit einer ähnlichen Anordnung wird in der EP 02 46 841 B1 beschrieben. Mit diesem Energieanalysator des Torroid-Kondensatortyps mit vor- und nachgeschaltetem Linsensystem wird eine Ortsauflösung von bis zu 2,5  $\mu\text{m}$  erreicht.

Hierbei wurde jedoch übersehen, dass die Gleichung  $\alpha_1 = -\alpha_0$  im allgemeinen nur eine grobe Näherung darstellt. In Nucl. Instr. Methods A29 (1990) Seite 60-66 wird gezeigt, dass Ein- und Austrittswinkel auch vom Ein- und Austrittsort abhängen. Ein- und Austrittswinkel unterscheiden sich deutlich, wenn Ein- und Austrittspositionen unterschiedlich sind. Es gilt dann  $(\tan \alpha_0) : x_0 = -(\tan \alpha_1) : x_1$ .

Die Aberrationen nehmen mit vergrößertem Bildfeld, also einem möglichen Unterschied zwischen  $x_1$  und  $x_0$  zu. Das folgende Beispiel verdeutlicht ihre Größe:

Bei einem Sichtfeld von 4 mm Durchmesser, also z. B.  $x_0 = 122 \text{ mm}$  und  $x_1 = 126 \text{ mm}$  zusammen mit einem Akzeptanzwinkel von  $\alpha_0 = 5^\circ$  berechnet man einen Ausfallswinkel von  $\alpha_1 = 5,16^\circ$ . Das sind 3 % Abwei-

chung vom Einfallswinkel. Daraus ergibt sich bei einem Blickfeld von 100  $\mu\text{m}$  Radius ein Abbildungsfehler von 3  $\mu\text{m}$  am Bildfeldrand.

Auch für Elektronen mit gleicher Eintrittsposition unter unterschiedlichem Eintrittswinkel ergibt sich eine unterschiedliche Austrittsposition und ein unterschiedlicher Austrittswinkel gemäß

$$\tan \alpha_1 = \tan \alpha_0 \left( 1 - \frac{2}{\cos^2 \alpha_0} \right)^{-1}$$

Dies wird beispielsweise in T. Sagara et al., Resolution improvements for hemispherical energy analyzers, Rev. Sci. Instr. 71, 2000, 4201-4207 beschrieben.

Ein anderes Beispiel benutzt einen Halbkugelanalysator in einem anderen Betriebsmodus. Hier sind die Potentiale so gewählt, dass sich die Elektronen auf einer Hyperbelbahn in einem quadratisch mit dem Radius ansteigenden Feld bewegen.

Im US-Patent 5,185,524 wird ein elektrostatischer sphärischer Spiegel-Analysator beschrieben. Die Elektronen treten durch Schlitz in die innere Kugel ein und werden durch ein Gegenfeld durch die Innenkugel hindurch wieder zu einem Fokus gebracht. Gegenstand und Bild befinden sich innerhalb der Innenkugel.

Nachteile dieser Anordnung werden in Nucl. Instr. Methods 42, 1966, 71-72 beschrieben. In der inneren Kugel befinden sich große Schlitz, wobei sich diese Schlitz nicht an der Stelle eines kleinen Strahlquerschnitts befinden. Um das an diesen Stellen erforderliche sphärische Potential sicherzustellen, werden an dieser Stelle Netze angebracht. Der verbleibende Felddurchgriff durch die Maschen begrenzt das erreichbare Ortsauflösungsvermögen. Jede Netzmasche stellt eine kleine

Streulinse dar. Ein weiterer Nachteil von Netzen im Strahlengang ist das Auslösen von Sekundärelektronen, welches zu einem erhöhten Untergrund führt und dadurch den darstellbaren Kontrast verringert. Der energiewählende Spalt befindet sich im elektrischen Feld zwischen den Hemisphären, ist also zwecks Verstellung nur schwer zugänglich. Die Spannungen, welche an die Außenkugel gelegt werden müssen, sind deutlich höher als beim konventionellen Halbkugelanalysator.

In diesem Design, wie auch in dem Vorigen gibt es inhärente Bildfehler, die auf die nur zweizählige Symmetrie des Aufbaues zurückgehen.

In der DE 196 33 496 A1 wird ein Monochromator für die Elektronenmikroskopie vorgestellt, welcher spiegelsymmetrisch aufgebaut ist. Der Aufbau in Form eines  $\Omega$  vermeidet Fehler zweiter Ordnung und auch einige Fehler dritter Ordnung verschwinden. Für den gewählten Aufbau war ein wesentliches Design-Kriterium das Vermeiden eines Zwischenfokus. Damit soll ermöglicht werden, einen primären Elektronenstrahl mit kleinem Durchmesser und hoher Stromdichte monochromatisieren zu können. Diese Forderung führt zu einer Lösung, die mechanisch aufwändig ist. Der Aufbau besteht aus acht toroidalen Sektoren, die sehr präzise zueinander justiert werden müssen. Das macht die Herstellung sehr kosten- und die Justage sehr zeitaufwendig.

Aus der US 5466933 ist ein Energiefilter bekannt, der aus einem komplementären gegenüberliegenden Paar von  $90^\circ$  Sektoren besteht die derart zueinander angeordnet sind, dass sie eine S-Form bilden. Zwischen den beiden Sektoren ist eine Aperturblende angeordnet. Mit diesem Energiefilter werden die ankommenden parallelen Elektronenstrahlen am Ausgang der Sektoranordnung abgebildet.

Mit dieser Anordnung unter Verwendung von parallelen Elektronenstrahlen wird zwar eine kontrastreiche Abbildung am Ausgang des E-



nergiefilters erzielt, allerdings ist die am Ausgang ankommende Intensität äußerst gering. Eine Intensitätssteigerung kann zwar dadurch erzielt werden, dass auch Elektronen mit Eintrittswinkel  $\alpha_0$  ungleich 0 zugelassen werden, allerdings tritt dann eine Verschmierung der Bildpunkte und somit eine Kontrastminderung auf.

Aufgabe der Erfindung ist es daher, einen Energiefilter zu schaffen, das sowohl eine kontrastreiche Abbildung bei hoher Ortsauflösung als auch eine hohe Intensität an seinem Ausgang gewährleistet.

Diese Aufgabe wird mit einem Energiefilter gelöst, das dadurch gekennzeichnet ist, dass zwischen der Austrittsebene des ersten Energieanalysators und der Eintrittsebene des zweiten Energieanalysators eine Transferlinseneinrichtung angeordnet ist.

Der Vorteil des Energiefilters besteht darin, dass nicht zwingend mit senkrecht auf die Eintrittsebene des ersten Energieanalysators auftretenden Teilchenstrahlen gearbeitet werden muss, d.h. dass der Eintrittswinkel  $\alpha_0$  ungleich 0 zugelassen werden kann, so dass am Ausgang des Energiefilters ein kontrastreiches Bild hoher Intensität erzeugt werden kann. Die am Ausgang des ersten Energieanalysators auftretenden Bildfehler, insbesondere Bildfehler zweiter Ordnung, werden durch die Transferlinseneinrichtung auf die Eintrittsebene des zweiten Energieanalysators transformiert, so dass beim Durchlaufen der geladenen Teilchen durch den zweiten Energieanalysator diese Bildfehler vollständig aufgehoben werden.

Die Abbildungsqualität des Energiefilters ist im Wesentlichen nur durch die Qualität der Transferlinseneinrichtung begrenzt.

Vorzugsweise ist die Transferlinseneinrichtung derart ausgelegt, dass sie in der energiedispersiven Ebene das Zwischenbild  $ZB_1$  in der Aus-

trittsebene des ersten Energieanalysators mit einer Linearvergrößerung

$$V_L = \frac{ZB_2}{ZB_1} \text{ und mit einer Winkelvergrößerung } V_W = \frac{\alpha_2}{\alpha_1} \text{ mit } V_W V_L \sqrt{\frac{E_2}{E_1}} = 1$$

verdrehen um den Winkel  $\beta$  auf die Eintrittsebene des zweiten Energieanalysators als Zwischenbild der Größe  $ZB_2$  abbildet, wobei  $\alpha_1$  der Austrittswinkel der geladenen Teilchen aus der Austrittsebene des ersten Energieanalysators,  $\alpha_2$  der Eintrittswinkel in die Eintrittsebene des zweiten Energieanalysators,  $E_1$  die kinetische Energie der geladenen Teilchen in der Austrittsebene des ersten Energieanalysators,  $E_2$  die kinetische Energie der geladenen Teilchen in der Eintrittsebene des zweiten Energieanalysators und  $\beta$  den Winkel zwischen den energiedispersiven Ebenen der beiden Energieanalysatoren bezeichnet und wobei die geladenen Teilchen in der Transferlinseneinrichtung einen teleskopischen Strahlengang durchlaufen.

Für  $\beta$  zwischen  $>90^\circ$  und  $<270^\circ$  haben  $V_L$  und  $V_W$  ein negatives und für  $\beta$  im Bereich zwischen  $270^\circ$  und  $90^\circ$  (über  $0^\circ$  bzw.  $360^\circ$ ) ein positives Vorzeichen.

Im Rahmen der Erfindung steht es grundsätzlich frei, welche Art von Ablenkfeldern eingesetzt werden. Neben magnetischen Feldern, die permanent oder durch Ströme erzeugt werden können, ist die Verwendung elektrostatischer Felder besonders bevorzugt.

Vorzugsweise sind die toroidalen Energieanalysatoren Kugelsektoren oder Zylinderanalysatoren.

Insbesondere sind Halbkugelanalysatoren mit Ablenk winkeln von  $\Phi = 180^\circ$  bevorzugt, weil diese eine besonders große Energiedispersion an ihrem Ausgang aufweisen.

In einem sphärischen, quadratisch ansteigenden Feld bewegen sich die geladenen Teilchen auf geschlossenen Ellipsenbahnen. Alle an einem Punkt mit unterschiedlicher Energie und auch verschiedenen Winkeln startenden Teilchen haben nach einem Umlauf von  $360^\circ$  exakt wieder ihre Anfangsposition erreicht, so dass keine Bildfehler auftreten. In einem solchen geschlossenen Kugelanalysator würden die beiden energiedispersiven Ebenen der beiden Halbkugeln definitionsgemäß den Winkel  $\beta = 0$  einschließen. Nach einem Umlauf von  $180^\circ$  haben die Teilchen mit unterschiedlichen Energien einen maximalen radialen Abstand voneinander. Bringt man hier eine Apertur an, welche das radiale Feld nicht stört, so erlaubt man nur Teilchen einer gewünschten Energie den Durchtritt. Allerdings wäre in einem solchen geschlossenen Kugelanalysator kein Platz zur Unterbringung von beispielsweise einer Eintrittslinse und einem Detektor oder der Transferlinse.

Da für einen Winkel  $\beta=0$  die Eintrittslinse und der Detektor auf einer Linie liegen, wird aus praktischen Gründen der Winkel  $\beta$  zwischen den Dispersionsebenen vorzugsweise aus dem Winkelbereich von  $5^\circ$  bis  $355^\circ$ , insbesondere von  $15^\circ$  bis  $340^\circ$ , gewählt.

Bei zwei Halbkugelanalysatoren, die derart zueinander angeordnet sind, dass ihre energiedispersiven Ebenen um den Winkel  $\beta$  gedreht sind, können die Eigenschaften eines vollständigen Kugelanalysators durch die abbildenden Eigenschaften der Transferlinseneinrichtung beibehalten werden, so dass am Ausgang des Energiefilters ebenfalls fehlerfreie Bilder entstehen. Die Transferlinseneinrichtung sorgt dafür, dass die Bahnen mit exakter Abbildung beibehalten werden, wobei lediglich der Eintrittspunkt in dem ersten Halbkugelanalysator räumlich vom Austrittspunkt des zweiten Halbkugelanalysators getrennt wird.

Es entsteht somit in der Wirkung ein sphärischer Kugelkondensator. Es ist bekannt, dass nicht relativistische Teilchen geschlossene periodi-

sche Ellipsenbahnen durchlaufen. Nach einem vollständigen Umlauf bleiben Winkel und Position erhalten. Das ist unabhängig von der Startposition, dem Eintrittswinkel oder der Energie der geladenen Teilchen. Wegen der Punktspiegelsymmetrie sind ein- und austretender Strahl parallel zueinander.

Vorzugsweise ist die energiedispersive Ebene der Halbkugelanalysatoren um  $\beta = 180^\circ$  um die Achse der Transferlinseneinrichtung gedreht angeordnet, so dass der Strahlengang eine S-förmige Gestalt aufweist. Diese Anordnung hat den Vorteil, dass eine besonders einfache Transferlinseneinrichtung verwendet werden kann.

Die Energieanalysatoren können unterschiedlich ausgelegt sein, was wiederum bei der Auslegung der Transferlinseneinrichtung berücksichtigt werden muss. Die Linearvergrößerung und die Winkelvergrößerung müssen bei unterschiedlichen Energieanalysatoren ebenso wie die kinetische Energie der geladenen Teilchen bei der Abbildung des Zwischenbildes auf der Eintrittsebene des zweiten Energieanalysators angepasst werden. Bei der Auslegung der Transferlinseneinrichtung ist daher die Lagrange-Helmholtz-Beziehung  $ZB_1 \cdot \alpha_1 \cdot \sqrt{E_1} = \text{const.} = ZB_2 \cdot \alpha_2 \cdot \sqrt{E_2}$  zu berücksichtigen.

Unter Kostengesichtspunkten ist es jedoch von Vorteil, wenn identische Energieanalysatoren verwendet werden. In diesem Fall ist die Linearvergrößerung  $V_L = -1$  und die Winkelvergrößerung  $V_w = -1$ .

Die punktsymmetrische Anordnung, worunter vorzugsweise eine zweizählige Punktsymmetrie (Symmetriegruppe  $C_{2h} = 2/m$ ) oder eine Anordnung mit einer zweizähligen Punktinversion ( $\bar{2}/m$ ) verstanden wird, spielt hierbei eine wesentliche Rolle.

Vorzugsweise umfasst die Transferlinseneinrichtung mindestens eine elektrostatische Linse, insbesondere eine elektrostatische Rohrlinse, die insbesondere in Verbindung mit zwei Halbkugelanalysatoren verwendet wird, deren energiedispersive Ebenen vorzugsweise um den Winkel  $\beta = 180^\circ$  gedreht zueinander angeordnet sind.

Die Transferlinseneinrichtung kann mindestens eine Magnetlinse umfassen. Magnetlinsen haben den Vorteil, dass sie kleinere Aberrationen aufweisen als elektrostatische Linsen. Sie werden daher bevorzugt dann eingesetzt, wenn auf Grund von um den Winkel  $\beta$  verdreht angeordneter Energieanalysatoren das Zwischenbild  $ZB_1$  ebenfalls um den Winkel  $\beta$  verdreht abgebildet werden muss.

Vorteilhafterweise ist die Austrittsebene des ersten Energieanalysators im Brennpunkt der ersten Linse und die Eintrittsebene des zweiten Energieanalysators im Brennpunkt der zweiten Linse angeordnet, wobei der Abstand beider Linsen  $2F$  beträgt und  $F$  die Brennweite der beiden Linsen bezeichnet.

Die Transferlinseneinrichtung kann auch mindestens eine elektrostatische oder magnetische Multipollinse umfassen. Multipollinsen haben den Vorteil, dass mit ihnen eine Abbildung ganz ohne sphärische Aberrationen realisiert werden kann. Eine Multipollinse wird derart zwischen den beiden Energieanalysatoren angeordnet, dass sich ein punktsymmetrischer Strahlengang ergibt. Der Ausgang des ersten Energieanalysators wird mit einer Winkel- und Linearvergrößerung vom Betrag 1 auf den Eintritt des zweiten Energieanalysators abgebildet.

Einsatz und Verwendung des Energiefilters sind vielfältig. Das Energiefilter kann dazu eingesetzt werden, einen Elektronenstrom von vorgebar und in ihren Grenzen veränderbarer Energiebreite zu erzeugen. Zu diesem Zweck wird die Elektronenquelle von großer Energiebreite

im Gegenstandspunkt des Energiefilters angeordnet, so dass man im Bildpunkt die stigmatische Abbildung der Quelle jedoch mit demgegenüber geringerer Energiebreite erhält. Das Energiefilter ist hierzu unmittelbar hinter der Elektronenquelle anzuordnen.

Eine andere Möglichkeit der Verwendung sieht vor, dass das Energiefilter in dem Abbildungsstrahlengang des abbildenden elektronenoptischen Systems angeordnet wird. Die Aufgabe des Energiefilters besteht darin, durch entsprechende Einstellung der Schlitzblenden Elektronen bestimmter Energien aus dem Strahlengang zu selektieren. Es ist hierbei unerheblich, ob ein Zwischenbild von der zu untersuchenden Probe, das Fouriertransformierte Zwischenbild oder eine andere Intensitätsverteilung des abbildenden Strahleneingangs in den Eintrittsschlitz des Energieanalysators gelegt wird. Durch Veränderung des Energiefilters lassen sich die Energien dieser geladenen Teilchen sowie die Energiebreite des erfassten Strahlenganges bestimmen und variieren.

Ein bevorzugter Einsatz betrifft den Einsatz in der Elektronenmikroskopie. Hierbei wird das Energiefilter bei der Abbildung der vom Objekt emittierten oder rückgestrahlten Elektronen eingesetzt. Diese Elektronen haben von Natur aus eine hohe Energiebreite. Eine Verbesserung des Kontrastes lässt sich durch Nutzung von Elektronen aus einem schmalen Energieband erreichen. Durch selektives Setzen des Energiefilters können sukzessive bestimmte Signale herausgegriffen und verstärkt und andere demgegenüber abgeschwächt werden. Eine gezielte Hervorhebung bestimmter Informationen ist auf diesem Wege möglich.

Eine weitere bevorzugte Verwendung des Energiefilters betrifft die Verwendung für zeitaufgelöste Messvorrichtungen. Der Vorteil des Energiefilters besteht darin, dass auch Flugzeitunterschiede, die im ersten Energieanalysator auftreten, durch die Transferlinseneinrichtung verbunden mit dem Durchlauf durch den zweiten Energieanalysator

bunden mit dem Durchlauf durch den zweiten Energieanalysator aufgehoben werden.

Beispielhafte Ausführungsformen der Erfindung werden nachfolgend anhand der Zeichnungen näher erläutert.

Es zeigen:

Figur 1 eine schematische Darstellung eines Energiefilters mit zwei Halbkugelanalysatoren,

Figur 2 eine schematische Darstellung einer Transferlinseneinrichtung,

Figur 3 eine Ausführungsform der in Figur 1 gezeigten Anordnung,

Figur 4 eine perspektivische Darstellung der in Figur 3 gezeigten Darstellung,

Figur 5 eine weitere Ausführungsform, die sich von der in Figur 4 gezeigten Ausführungsform durch einen anderen Drehwinkel unterscheidet,

Figur 6 eine schematische Darstellung einer weiteren Ausführungsform mit Kugelsektoren als Energieanalysatoren,

Figur 7 eine weitere Ausführungsform mit insgesamt vier Toroidsektoren,

Figur 8 ein Energiefilter mit Zylinderanalysatoren,

Figur 9 eine Transferlinseneinrichtung mit Multipollinsen und

Figur 10 eine Transferlinseneinrichtung mit Magnetlinsen.

In der Figur 1 ist ein schematischer Querschnitt durch einen Energiefilter dargestellt, der zwei Halbkugelanalysatoren 30 und 40 aufweist, zwischen denen eine Transferlinseneinrichtung 20 angeordnet ist. Die beiden Energieanalysatoren 30, 40 zusammen mit der Transferlinseneinrichtung 20 sind derart angeordnet, dass der Strahlengang in einer Ebene liegt und eine S-förmige Gestalt aufweist.

Die Gesamtanordnung ist punktsymmetrisch bezüglich des Zentrums Z der Transferlinseneinrichtung 20, wobei die Punktsymmetrie zweizählig ist.

Hierbei durchlaufen die Elektronen im ersten Energieanalysator 30 eine Linkskurve und nach dem Durchlaufen der Transferlinseneinrichtung 20 im zweiten Energieanalysator 40 eine Rechtskurve. Dies bedeutet, dass die beiden energiedispersiven Ebenen 33, 43 der beiden Energieanalysatoren um den Winkel  $\beta = 180^\circ$  zueinander gedreht sind (siehe Figur 4).

In der Figur 1 sind lediglich die mittleren Strahlengänge 4 und 7 der Elektronen eingezeichnet. Das Energiefilter besitzt abbildende Eigenschaften unter Vermeidung von Abberationen zweiter Ordnung.

Die Oberfläche 1' der Probe 1 befindet sich im Abstand g von dem ersten Linsensystem 2, die die von der Oberfläche 1' austretenden Elektronen auf die Eintrittsebene 3 des ersten Halbkugelanalysators 30 abbildet.



Die Gegenstandsweite  $g$  kann auch gleich der Brennweite des Linsensystems 2 sein, so dass die Bildweite  $b$  ungefähr gleich unendlich wird. In diesem Fall wird vorzugsweise die Eintrittsebene 3 des ersten Energieanalysators 30 in der bildseitigen Brennebene des Linsensystems 2 angeordnet.

In der Eintrittsebene 3 befindet sich eine erste energiedefinierende Schlitzblende 25, die sich senkrecht zur Zeichenebene erstreckt und die Breite  $B_1$  aufweist (s. auch Figur 3).

Der Halbkugelanalysator 30 bildet die durch die Schlitzblende 25 eintretenden Elektronen mit Abberationen in der Austrittsebene 5 ab, wo sich eine der Breite  $B_2$  zweite Schlitzblende 26 befindet.

Da die Elektronen in die in der Eintrittsebene 3 befindliche Schlitzblende 25 unter verschiedenen Eintrittswinkeln  $\alpha_0$  eintreten, treten sie beim Verlassen des Ablenkfeldes des ersten Energieanalysators ebenfalls unter verschiedenen Austrittswinkeln  $\alpha_1$  aus.

Die zweite Schlitzblende 26 erstreckt sich senkrecht zur Zeichenebene, in der der Linienfokus des astigmatischen Zwischenbildes  $ZB_1$  23 liegt. Die Energiedispersion erfolgt in der Zeichenebene, worunter eine Abweichung vom mittleren Strahlengang 4 um einen Wert verstanden wird, der proportional der Energieabweichung ist. Durch Veränderung der Schlitzbreite  $B_2$  (s. auch Figur 3) lässt sich selektiv die Energiebreite der von der Schlitzblende 26 durchgelassenen Elektronen einstellen bzw. verändern. Im Ergebnis erreichen nur jene Elektronen das Zwischenbild  $ZB_1$  23, die sich innerhalb dieser Energiebreite befinden. Der Elektronenstrahl ist im Ergebnis monochromatisch.

Dieser Austrittsebene 5 ist eine Transferlinseneinrichtung 20 nachgeordnet, die aus zwei identischen konvergenten Linsen 21 und 22 be-

steht und das in der Austrittsebene 5 erzeugte erste Zwischenbild 23 als umgekehrtes zweites Zwischenbild  $ZB_2$  24, d.h.  $V_L = -1$ , auf die Eintrittsebene 6 des zweiten Energieanalysators 40 abbildet.

Die Transferlinseneinrichtung 20 bildet das Zwischenbild  $ZB_1$  23 nicht nur umgekehrt, sondern auch unter Winkelumkehr auf die Eintrittsebene 6 ab, so dass für die Eintrittswinkel  $\alpha_2$  in der Eintrittsebene 6 des zweiten Energieanalysators 40  $\alpha_2 = -\alpha_1$  gilt.

Im zweiten Energieanalysator 40 werden durch die Umkehrung des Astigmatismus des Zwischenbildes  $ZB_1$  23 in Verbindung mit der Umkehrung der Bahnkrümmung im Vergleich zum ersten Energieanalysator 30 die Bildfehler aufgehoben, so dass in der Austrittsebene 8 ein energiegefiltertes stigmatisches Bild 29 entsteht, das mittels des Linsensystems 9 auf einem Detektor 10 projiziert werden kann.

Auch der zweite Energieanalysator 40 besitzt in dieser Ausführung eine Schlitzblende 27 mit der Breite  $B_3$  in der Eintrittsebene 6 und eine Schlitzblende 28 mit der Breite  $B_4$  in der Austrittsebene 8.

Für den Fall, dass die Oberfläche 1' der Probe 1 oder ein vergrößertes oder verkleinertes Abbild im Abstand der Brennweite des Linsensystems 2 positioniert wird, ist auch das Linsensystem 9 im Abstand der Brennweite von der Austrittsebene 8 und der Detektor 10 im Abstand der Brennweite des Linsensystems 9 angeordnet.

In den Eintritts- und Austrittsebenen der beiden Energieanalysatoren 30, 40 befinden sich dann anstelle reeller Bilder Beugungsbilder. Falls man die Linsensysteme 2 und 9 asymmetrisch betreibt, kann man mit dem Energiefilter unter Vermeidung von Aberrationen zweiter Ordnung das Beugungsbild der Probe 1 erhalten. Die Linsensysteme werden

„asymmetrisch betrieben“ genannt, wenn entweder mithilfe des Linsensystems 2 die Oberfläche der Probe in die Eintrittsebene 3 gelegt wird und das Linsensystem 9 so eingestellt wird, dass das Zwischenbild 29 in der Brennweite des Linsensystems 9 liegt, oder umgekehrt das Linsensystem 2 so eingestellt wird, dass die Probenoberfläche (oder ihr Zwischenbild) in der Brennebene der Linse liegt und gleichzeitig die Ebene 8 mit dem Linsensystem 9 scharf auf dem Detektor 10 abgebildet wird.

Das Beugungsbild der Probe wird dann mithilfe des Linsensystems 2 in die Eintrittsebene 3 gelegt. Dieses Beugungsbild wird energetisch gefiltert und gelangt zur Austrittsebene 8. Von dort wird es mit dem Linsensystem 9 auf den Detektor 10 abgebildet.

In der Figur 2 ist schematisch der Strahlengang in der Transferlinseneinrichtung 20 dargestellt. Die beiden identischen, elektrostatischen Sammellinsen 21, 22 weisen eine F-2F-F-Anordnung auf, wobei F die Brennweite der Linsen 21, 22 bezeichnet. Aufgrund dieser Linsenanordnung wird das erste Zwischenbild  $ZB_1$  23 in der Austrittsebene 5 mit der Linearvergrößerung  $V_L = -1$  und das Strahlenbündel mit der Winkelvergrößerung  $V_W = -1$  auf der Eintrittsebene 6 als zweites Zwischenbild  $ZB_2$  24 abgebildet. Der Strahlengang ist punktsymmetrisch und teleskopisch.

In der nicht dispersiven Ebene kann bei Verwendung anderer Linsen, z.B. elektronenoptische Zylinderlinsen, die Winkel- und Linearvergrößerung auch + 1 betragen.

Die Figur 3 zeigt eine mögliche Ausführungsform der in Figur 1 schematisch dargestellten Anordnung mit drei möglichen Elektronenbahnen  $E_0$ ,  $E_1$  und  $E_2$ . Es ist ein Schnitt durch die energiedispersiven Ebenen dargestellt.

Die Elektronen starten von der Oberfläche 1' der Probe 1 und treten durch die Schlitzblende 25 mit der Breite  $B_1$  in den ersten Halbkugelanalysator 30 ein, in dem zwischen der Innenschale 31 und der Außenschale 32 ein elektrostatisches Ablenkkfeld angelegt ist.

Wenn die Elektronen senkrecht am Ort  $X_0$  durch die Schlitzblende 25 eintreten, beschreiben sie die Bahn  $E_0$ , die im ersten und zweiten Halbkugelanalysator jeweils einen Halbkreis beschreibt.

Da die Bahn  $E_0$  auf der Achse 200 der Transferlinseneinrichtung 20 auftrifft, wird sie ebenfalls am Ort  $X_0$  der Schlitzblende 27 des zweiten Halbkugelanalysators 40 abgebildet und durchläuft im zweiten Halbkugelanalysator eine Bahn, die punktsymmetrisch zum Punkt Z verläuft.

Die Elektronen auf der Bahn  $E_1$  starten am Ort  $X_1$  der Schlitzblende 25 des ersten Halbkugelanalysators 30 mit anderer Energie und dem Eintrittswinkel  $\alpha_{0,1}$ , während die Elektronen der Bahn  $E_2$  im Ort  $X_1$  mit dem Eintrittswinkel  $-\alpha_{0,2}$  starten. Die Elektronen werden zum Punkt  $X_2$  in der zweiten Schlitzblende 26 abgelenkt, wobei sie jeweils elliptische Bahnen beschreiben. Die Austrittswinkel sind  $\alpha_{1,1}$  und  $\alpha_{1,2}$ , wobei in diesem Beispiel  $|\alpha_{1,1}| = |\alpha_{1,2}|$  gewählt wurde.

Der Bildpunkt  $X_0$  des ersten Zwischenbildes  $ZB_1$  in der Schlitzblende 26 wird mit der Linearvergrößerung -1 und mit der Winkelvergrößerung -1 in der Ebene 6 am Ort  $X_3$  als Bildpunkt des zweiten Zwischenbildes  $ZB_2$  abgebildet. Für die Winkel gilt daher  $\alpha_{1,2} = -\alpha_{2,2}$  und  $\alpha_{1,1} = -\alpha_{2,1}$ .

Im zweiten Energieanalysator 40 liegt zwischen der Innenschale 41 und der Außenschale 42 ein gleichstarkes elektrostatisches Ablenkkfeld an, so dass die Elektronenbahnen  $E_1$  und  $E_2$  elliptische Bahnen durchlaufen, die den elliptischen Bahnen im ersten Energieanalysator 30 entsprechen. Die Elektronen treten am Ort  $x_4$  unter den Winkeln  $\alpha_{31}$  und

$\alpha_{3,2}$  aus, die wiederum den Winkeln  $\alpha_{0,1}$  und  $\alpha_{0,2}$  entsprechen. Die Abweichung der Winkel  $\alpha_{1,1}$  und  $\alpha_{1,2}$  wird durch den zweiten Durchlauf durch den Energieanalysator 40 kompensiert. Auch bezüglich des Ortes  $x_4$  gilt  $x_4=x_1$ . Es wird somit in der Ebene der Schlitzblende 28 ein energiegefiltertes Bild der Probe 1 ohne Abbildungsfehler erhalten.

In der Figur 4 ist die in Figur 3 gezeigte Ausführungsform perspektivisch dargestellt. In den Halbkugelanalysatoren 30 und 40 sind die energiedispersiven Ebenen 33 und 43 sowie die Schlitzblenden 25, 26, 27 und 28 eingezeichnet. Der zweite Halbkugelanalysator 40 ist um die durch die Schlitzblende 27 verlaufende Achse 200 der Transferlinseneinrichtung 20 um den Winkel  $\beta = 180^\circ$  gedreht angeordnet.

In der Figur 5 ist eine weitere Ausführungsform dargestellt, in der der zweite Halbkugelanalysator 40 lediglich um den Winkel  $\beta = 90^\circ$  um die durch die Schlitzblende 27 verlaufende Achse 200 gedreht angeordnet ist.

In der Figur 6 ist eine der Figur 3 entsprechende Ausführungsform dargestellt, wobei anstelle der Halbkugelanalysatoren 20, 30 jeweils Kugelsektoren 20' und 30' mit Innenschalen 31', 41' und Außenschalen 32', 42' verwendet werden, deren Ablenkwinkel  $\phi \leq 180^\circ$  betragen. Die Anordnung der Blenden 25, 26 und 27 unterscheidet sich in der Anordnung in Fig. 3 dadurch, dass sie nicht in den Eintritts- bzw. Austrittsebenen der Kugelsektoren platziert sind. Auch diese Ausführungsform zeigt bezüglich des Punktes Z eine zweizählige Punktsymmetrie.

In der Figur 7 ist die in Figur 6 gezeigte Anordnung um zwei weitere Toroidsektoren 50a und 50b ergänzt, wobei der Toroidsektor 50a vor dem ersten Kugelsektor 30' und der Toroidsektor 50b hinter dem zweiten Kugelsektor 40' angeordnet ist. Diese zusätzlichen Toroidsektoren

50a und 50b dienen dazu, Aberrationen höherer Ordnung zu korrigieren.

Figur 8 zeigt einen Energiefilter bestehend aus zwei Zylinderanalysatoren 30' und 40' mit Innenschalen 31'', 41'' und Außenschalen 32'' und 42'' und eine Transferlinseneinrichtung 20. Die Achse 200 des Transferlinsensystems 20 liegt nicht kollinear zu den Zylinderachsen 34 und 44, sondern in Richtung der mittleren Bahnen 4', 7' durch die Zylinderanalysatoren, welche einen Winkel von  $42,3^\circ$  mit den Zylinderachsen 34, 44 einschließen.

Die Figuren 9a, b zeigen eine Transferlinseneinrichtung 20, die sowohl die sphärische Abberation, als auch den Komafehler vermeidet. Dies lässt sich erreichen durch eine Kombination von elektrischen oder magnetischen Rundlinsen (21, 22) mit zwei Sextupol-Linsen 121 und 122. Die Achse 200 der Transferlinseneinrichtung entspricht der Richtung z.

In der Abbildung 9a ist ein achsensenkrechter Schnitt durch ein Sextupolsegment gezeigt. Die Kraft F auf ein Teilchen ändert ihre Richtung zwischen zwei benachbarten Elektroden, die in Bezug auf das Achsenpotential alternierend mit den Spannungen U bzw.  $-U$  belegt sind.

In Teilbild 9b ist schematisch der Verlauf der achsenfernen Bahnen zweier im xy-Schnitt achsenparallel einfallender Elektronen im Falle ausgeschalteter (gestrichelt) und erregter (durchgezogene Linie) Sextupole 121 und 122 dargestellt. Die achsennahe Bahn wird durch die Sextupole nur sehr wenig beeinflusst.

Die Sextupole liegen in der Austritts- bzw. Eintrittsebene 5, 6 der Energieanalysatoren.

Figur 10 zeigt eine zu den elektrostatischen Linsen der Figur 2 analoge magnetische Transferlinseneinrichtung 20 in schematischer Darstellung. Das Magnetfeld der Linsen 22' und 21' wird durch Spulen erzeugt. Wesentlicher Unterschied zu einer elektrostatischen Transferlinseneinrichtung ist eine zusätzliche Verdrehung des Bildes, so dass der Drehwinkel  $\beta$  von  $180^\circ$  abweichen kann.

## Bezugszeichen

1	Probe
1'	Probenoberfläche
2	Linsensystem
3	Eintrittsebene
4, 4'	Mittlerer Strahlengang im ersten Energieanalysator
5	Austrittsebene
6	Eintrittsebene
7, 7'	Mittlerer Strahlengang im zweiten Energieanalysator
8	Austrittsebene
9	Linsensystem
10	Detektor
20, 20'	Transferlinseneinrichtung
21, 21'	Erste Transferlinse
22, 22'	Zweite Transferlinse
23	Erstes Zwischenbild
24	Zweites Zwischenbild
25	Erste Schlitzblende
26	Zweite Schlitzblende
27	Dritte Schlitzblende
28	Vierte Schlitzblende
29	Bild
30, 30'	Erster toroidaler Energieanalysator
31, 31', 31''	Innenschale
32, 32', 32''	Außenschale
33	energiedispersive Ebene
34	Achse
40, 40'	Zweiter toroidaler Energieanalysator
41, 41', 41''	Innenschale
42, 42', 42''	Außenschale
43	energiedispersive Ebene



44	Achse
50a, b	Toroidesektor
121	Sextupollinse
122	Sextupollinse
200	Achse der Transferlinseneinrichtung

## Patentansprüche

1. Energiefilter für elektrisch geladene Teilchen, wie Elektronen und Ionen, mit mindestens zwei toroidalen hintereinander angeordneten Energieanalysatoren, wobei mindestens ein Energieanalysator in seiner Eintritts- und Austrittsebene jeweils eine Blende aufweist, **dadurch gekennzeichnet**,

dass zwischen der Austrittsebene (5) des ersten Energieanalysators (30, 30', 30'') und der Eintrittsebene (6) des zweiten Energieanalysators (40, 40', 40'') eine Transferlinseneinrichtung (20, 20') angeordnet ist.

2. Energiefilter nach Anspruch, **dadurch gekennzeichnet**, dass die Transferlinseneinrichtung (20, 20') derart ausgelegt ist, dass sie in der energiedispersiven Ebene (33) das Zwischenbild ZB<sub>1</sub> (23) in der Austrittsebene (5) des ersten Energieanalysators (30, 30', 30'') mit einer Linearvergrößerung von

$$V_L = \frac{ZB_2}{ZB_1} \quad \text{und mit einer Winkelvergrößerung} \quad V_w = \frac{\alpha_2}{\alpha_1} \quad \text{mit}$$

$$V_w V_L \sqrt{\frac{E_2}{E_1}} = 1 \quad \text{verdrehen um den Winkel } \beta \quad \text{auf die Eintrittsebene}$$

(6) des zweiten Energieanalysators (40, 40', 40'') als Zwischenbild ZB<sub>2</sub> (24) abbildet,

wobei  $\alpha_1$  der Austrittswinkel der geladenen Teilchen aus der Austrittsebene (5) des ersten Energieanalysators (30, 30', 30''),  $\alpha_2$  der Eintrittswinkel in die Eintrittsebene (6) des zweiten Energieanalysators (40, 40', 40''),  $E_1$  die kinetische Energie der geladenen

nen Teilchen in der Austrittsebene des ersten Energieanalysators (30, 30', 30''),  $E_2$  die kinetische Energie der geladenen Teilchen in der Eintrittsebene des zweiten Energieanalysators (40, 40', 40'') und  $\beta$  den Winkel zwischen den energiedispersiven Ebenen (33, 43) der beiden Energieanalysatoren (30, 30', 30'', 40, 40', 40'') bezeichnet und

wobei die geladenen Teilchen in der Transferlinseneinrichtung (20, 20') einen teleskopischen Strahlengang durchlaufen.

3. Energiefilter nach Anspruch 1 oder 2, **dadurch gekennzeichnet**, dass die Energieanalysatoren Kugelsektoren (30', 40'), Halbkugelanalysatoren (30, 40) oder Zylinderanalysatoren (30'', 40'') sind.
4. Energiefilter nach einem der Ansprüche 1 bis 3 **dadurch gekennzeichnet**, dass die energiedispersiven Ebenen (33, 43) der Halbkugelanalysatoren (30, 40) um den Winkel  $\beta = 180^\circ$  um die Achse 200 der Transferlinseneinrichtung (20) gedreht angeordnet sind, so dass der Strahlengang eine S-förmige Gestalt aufweist.
5. Energiefilter nach einem der Ansprüche 1 – 3, **dadurch gekennzeichnet**, dass die Transferlinseneinrichtung (20) mindestens eine elektrostatische Rohrlinse (21, 22) umfasst.
6. Energiefilter nach einem der Ansprüche 1 – 4, **dadurch gekennzeichnet**, dass die Transferlinseneinrichtung (20') mindestens eine Magnetlinse umfasst.

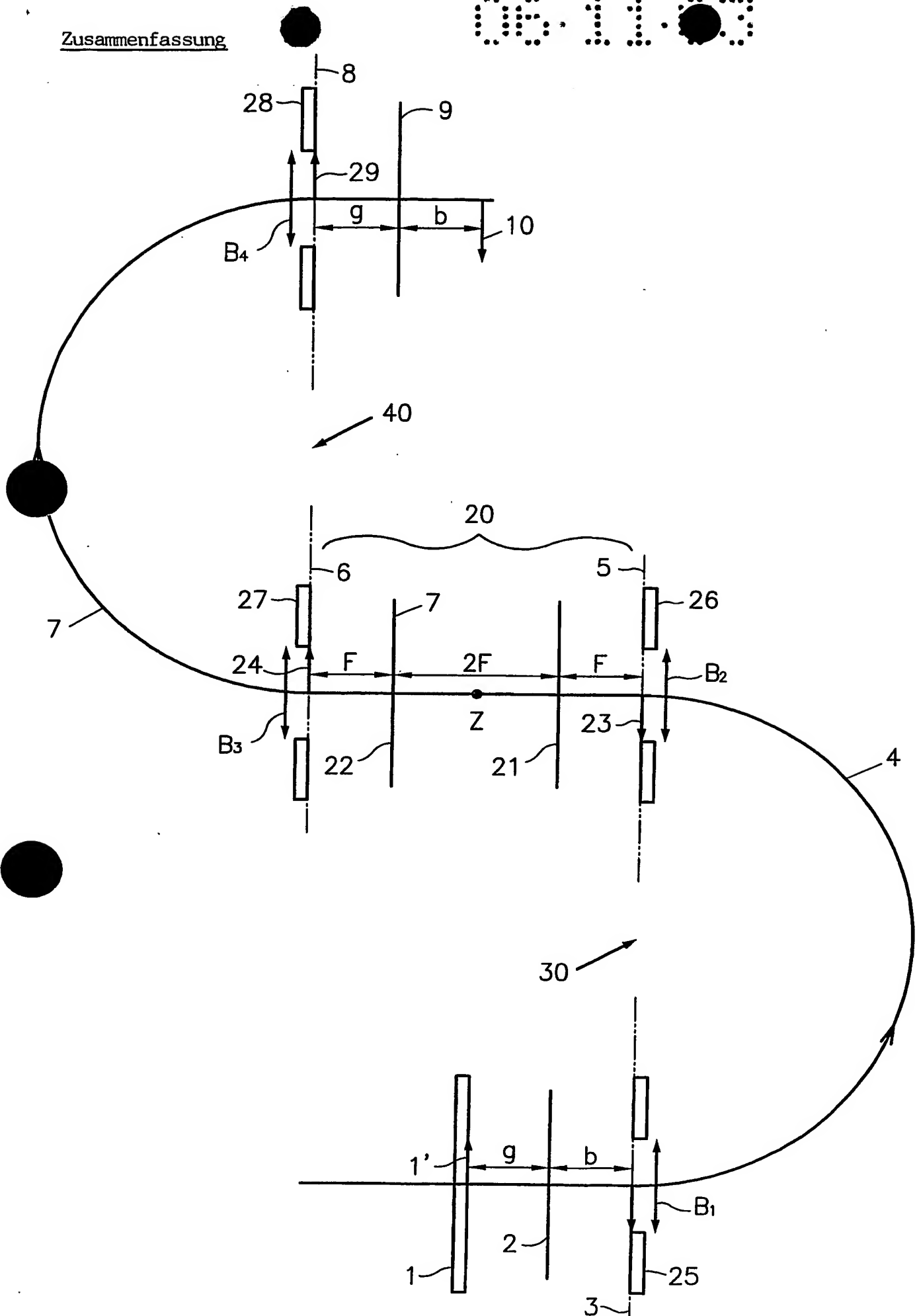
7. Energiefilter nach Anspruch 5 oder 6, **dadurch gekennzeichnet**, dass die Austrittsebene (5) des ersten Energieanalysators (30, 30', 30'') im Brennpunkt der ersten Linse (21, 21') und die Eintrittsebene (6) des zweiten Energieanalysators (40, 40', 40'') im Brennpunkt der zweiten Linse (22, 22') angeordnet ist, wobei der Abstand beider Linsen  $2F$  beträgt und  $F$  die Brennweite der Linsen (21, 22, 21', 22') bezeichnet.
8. Energiefilter nach einem der Ansprüche 1 – 4, **dadurch gekennzeichnet**, dass die Transferlinseneinrichtung (20) mindestens eine Multipollinse (121, 122) umfasst.
9. Verwendung eines Energiefilters nach einem der Ansprüche 1 – 8 für Elektronenmikroskope.
10. Verwendung eines Energiefilters nach einem der Ansprüche 1 – 8 für zeitaufgelöste Messvorrichtungen.

## **Zusammenfassung**

### **Energiefilter für elektrisch geladene Teilchen und Verwendung des Energiefilters**

Es wird ein Energiefilter für elektrisch geladene Teilchen mit mindestens zwei toroidalen, hintereinander angeordneten Energieanalysatoren 30, 40 beschrieben. Zwischen der Austrittsebene 5 des ersten Energieanalysators 30 in der Eintrittsebene 6 des zweiten Energieanalysators 40 ist eine Transferlinseneinrichtung 20 angeordnet. Es wird damit eine energiegefilterte, fehlerfreie Abbildung der Oberfläche 1' der Probe 1 auf dem Detektor 10 ermöglicht.

(Figur 1)



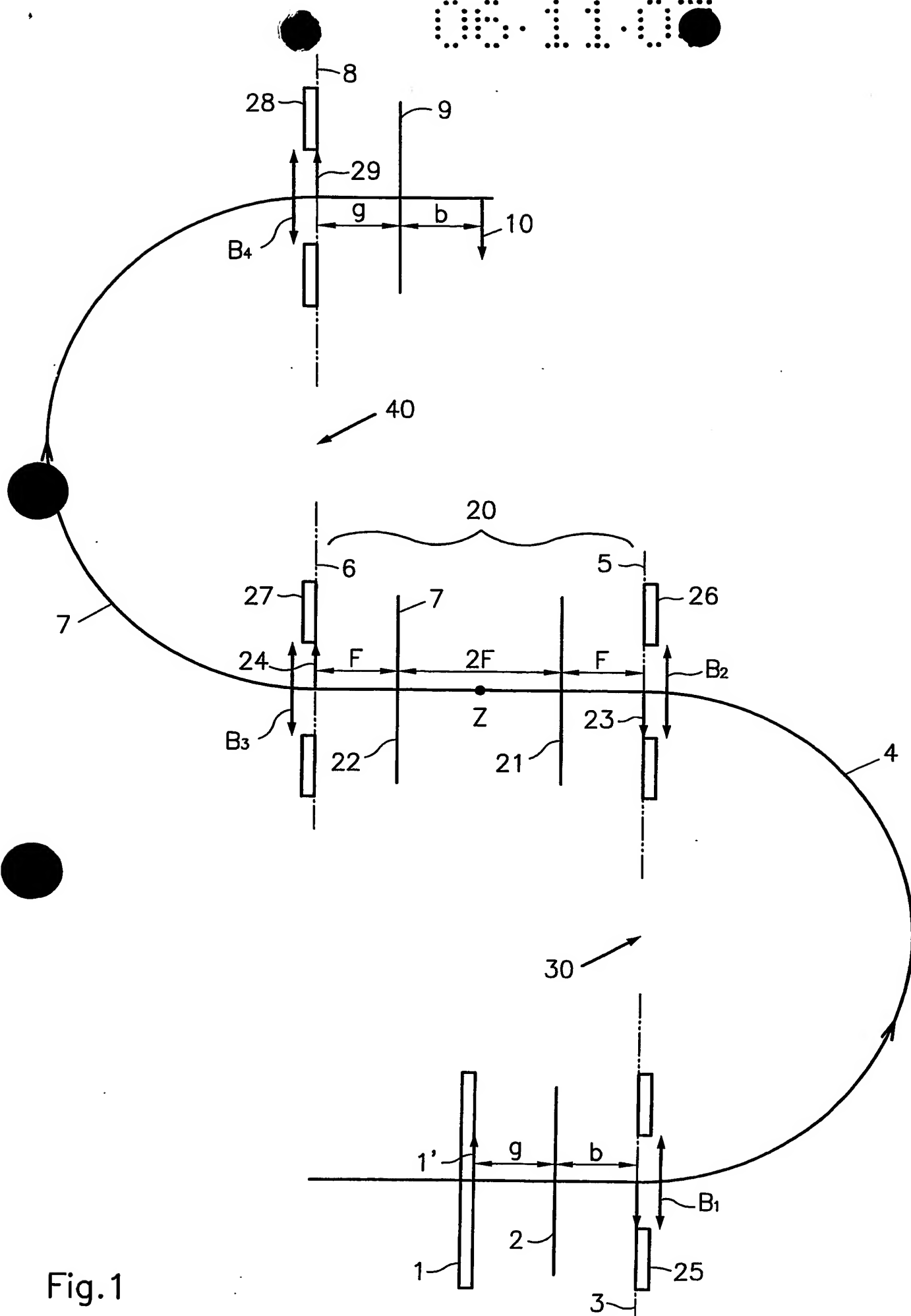


Fig.1

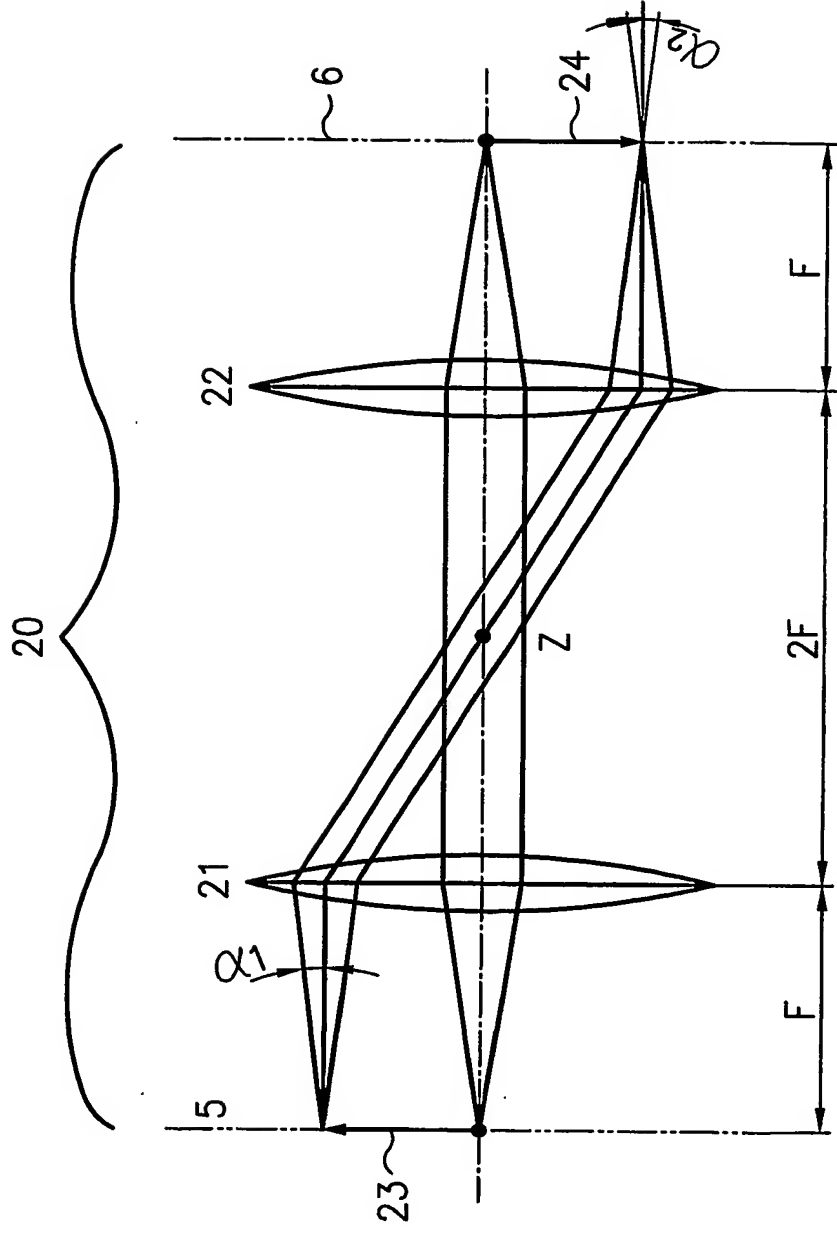


Fig.2



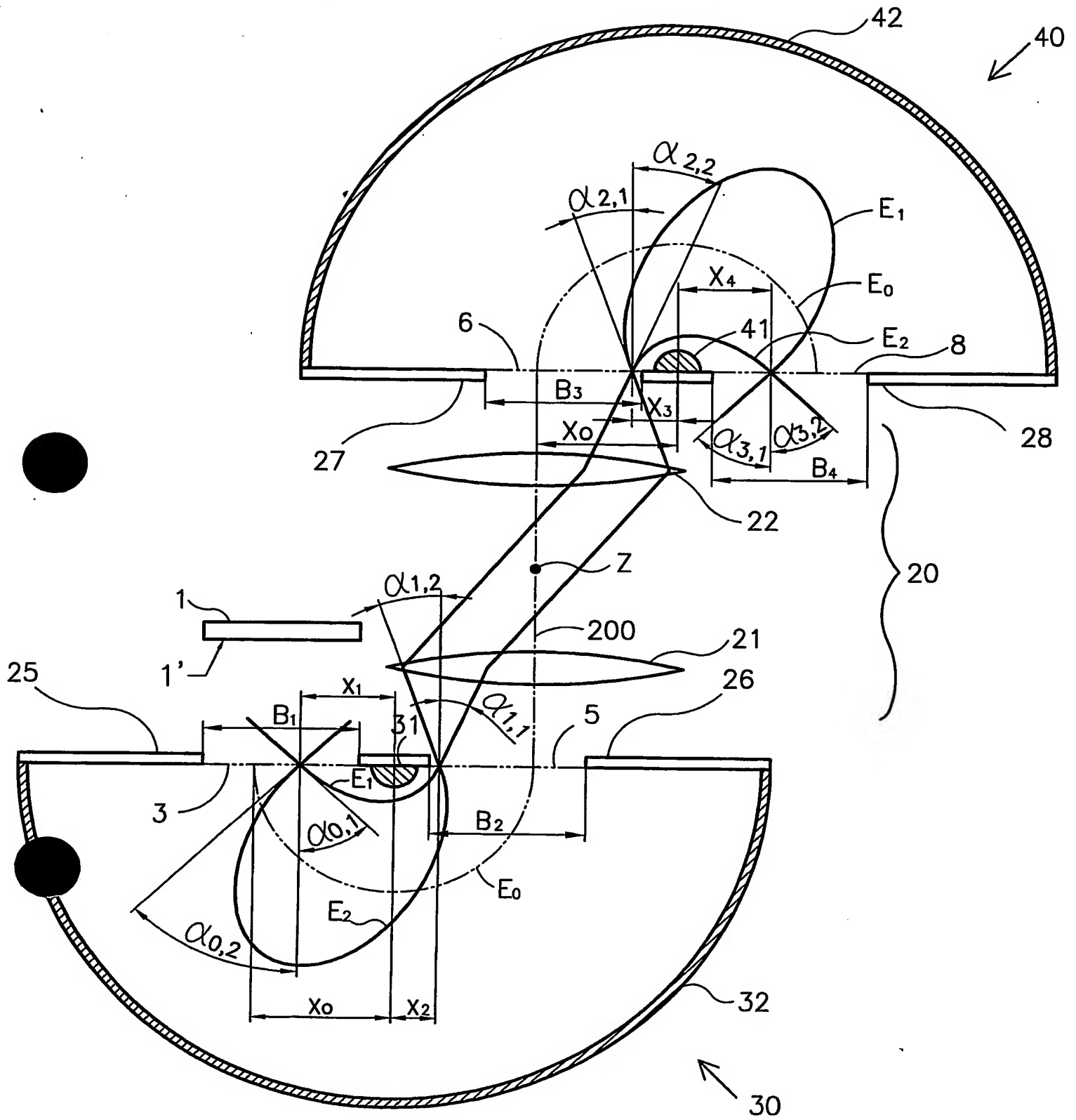


Fig.3

06.11.03

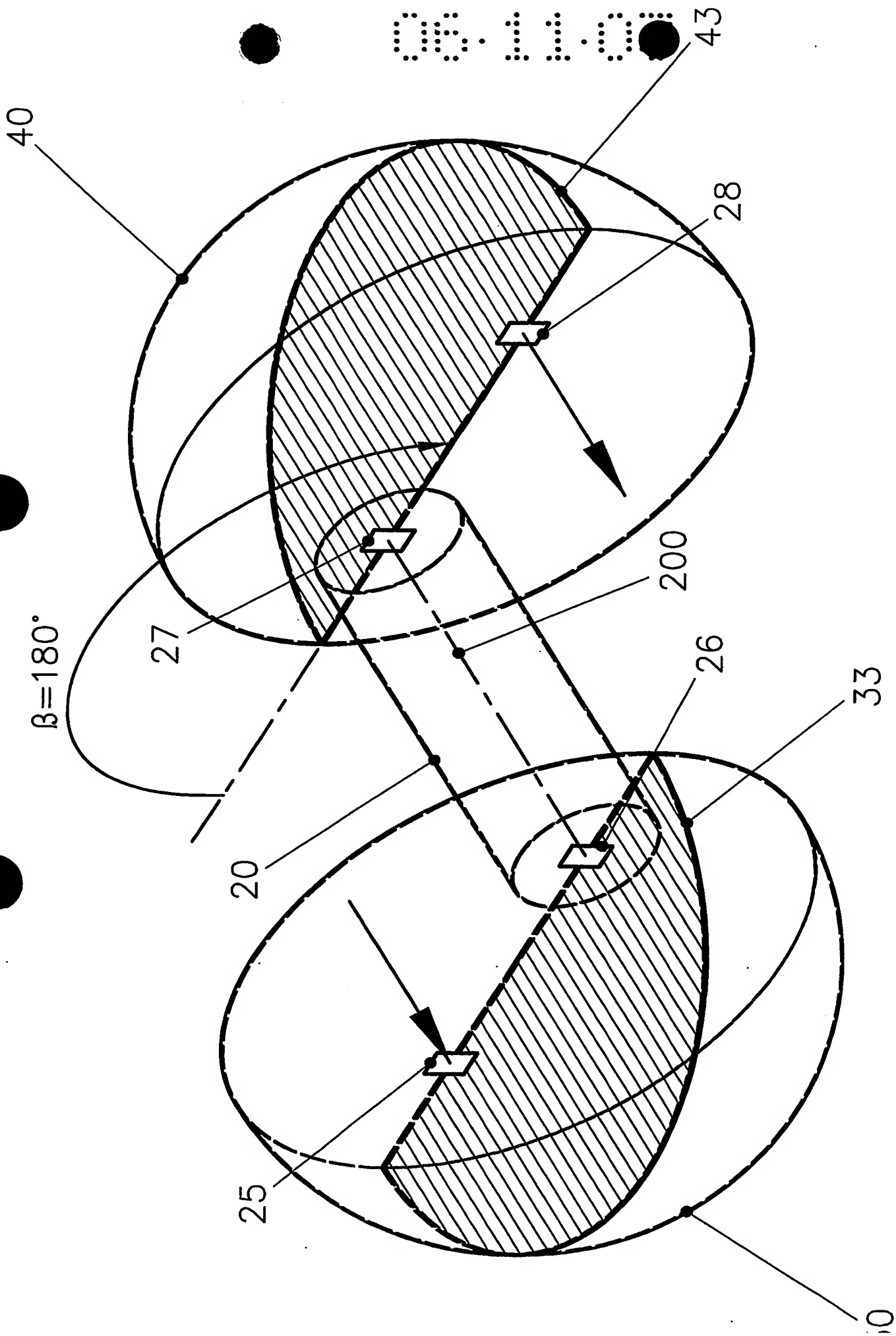


FIG 4

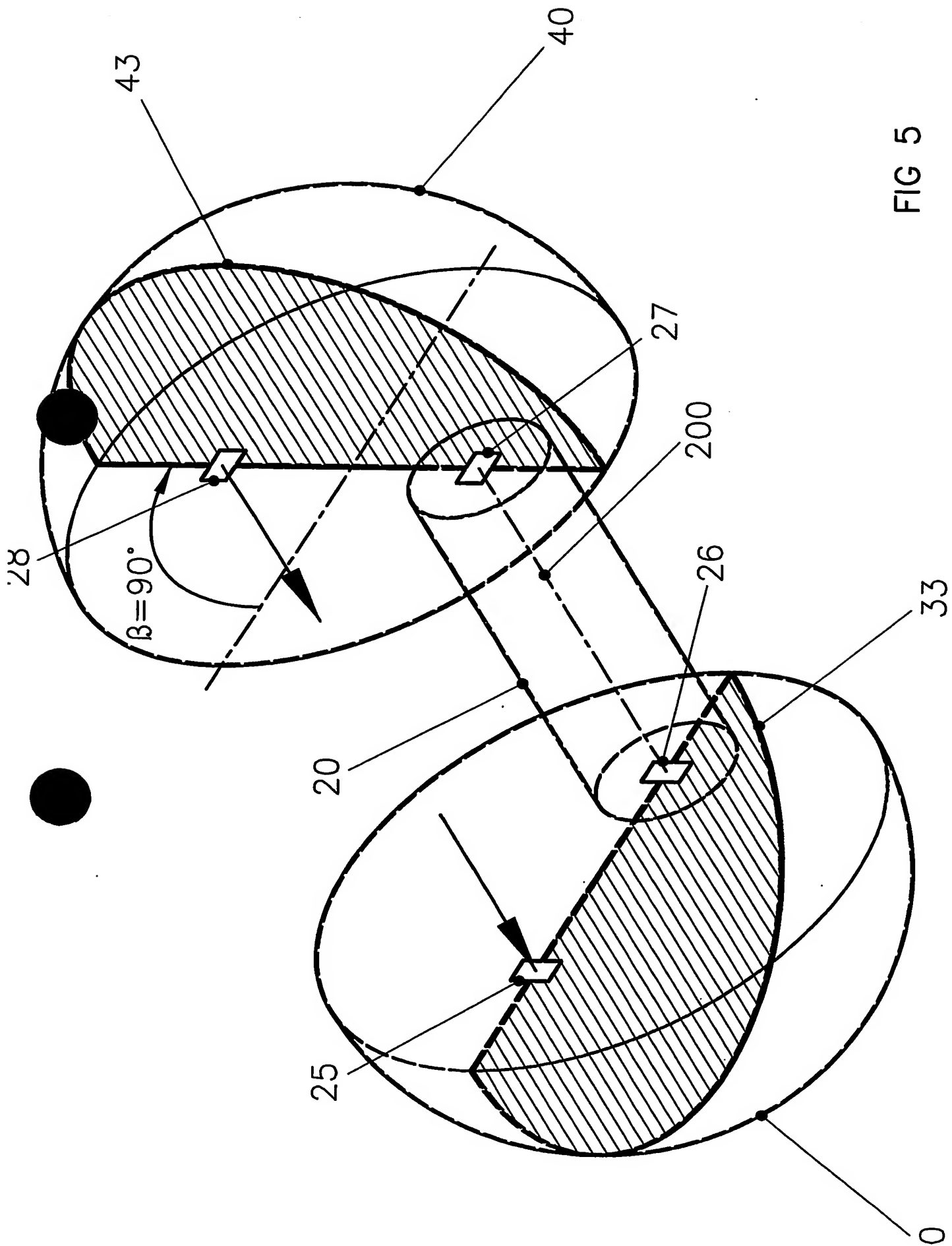


FIG 5

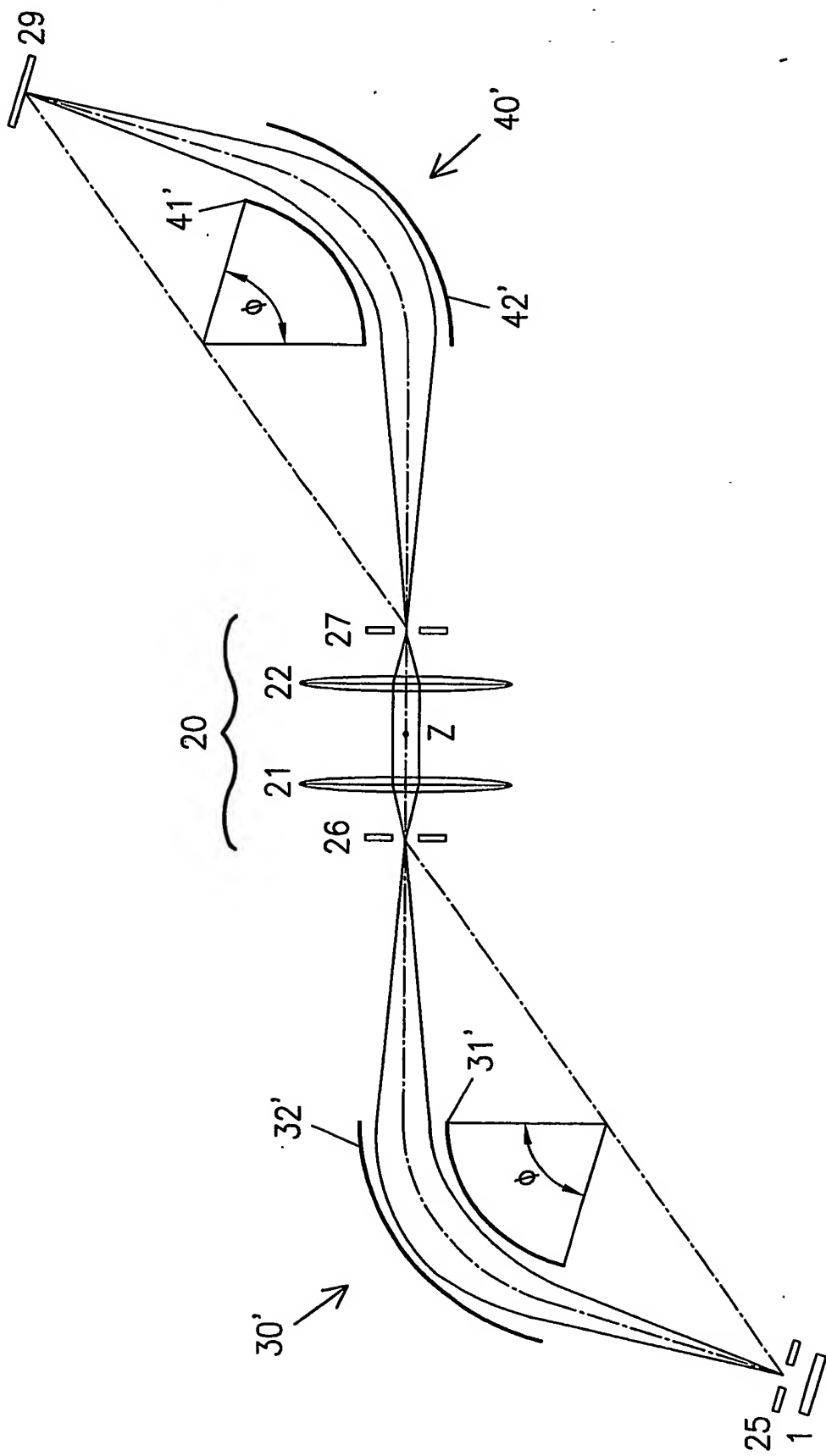


Fig.6

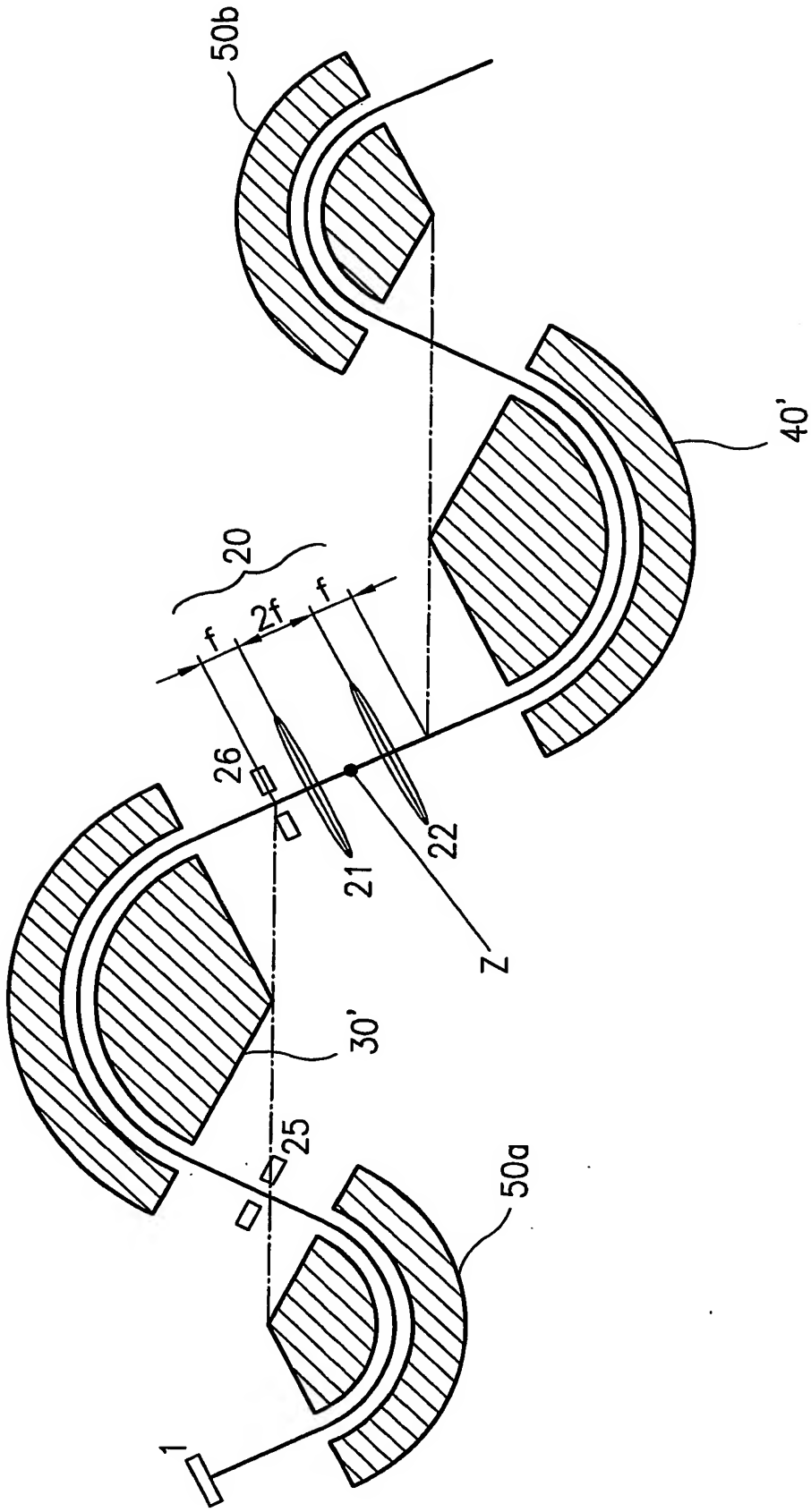


Fig.7

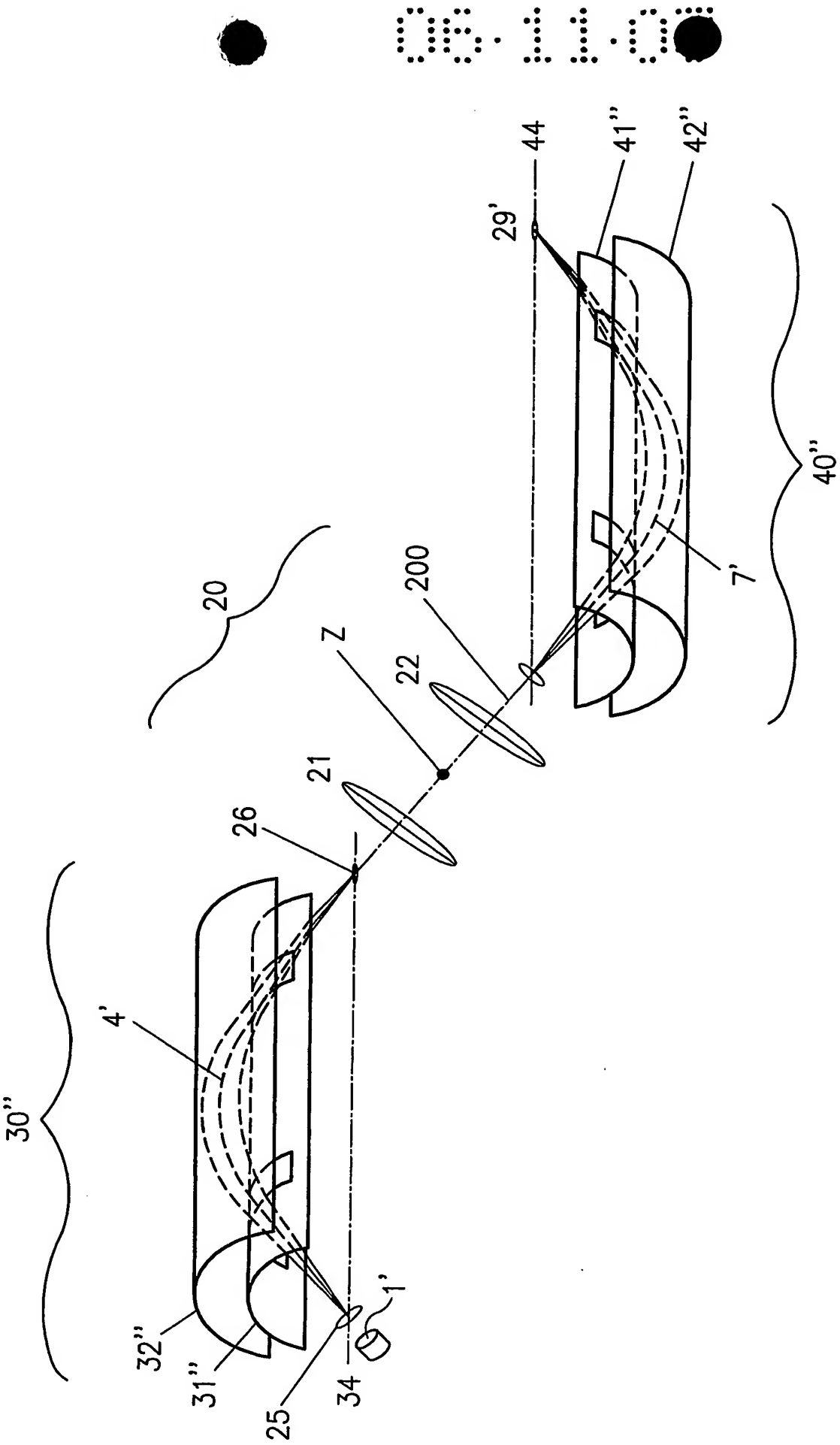


Fig.8

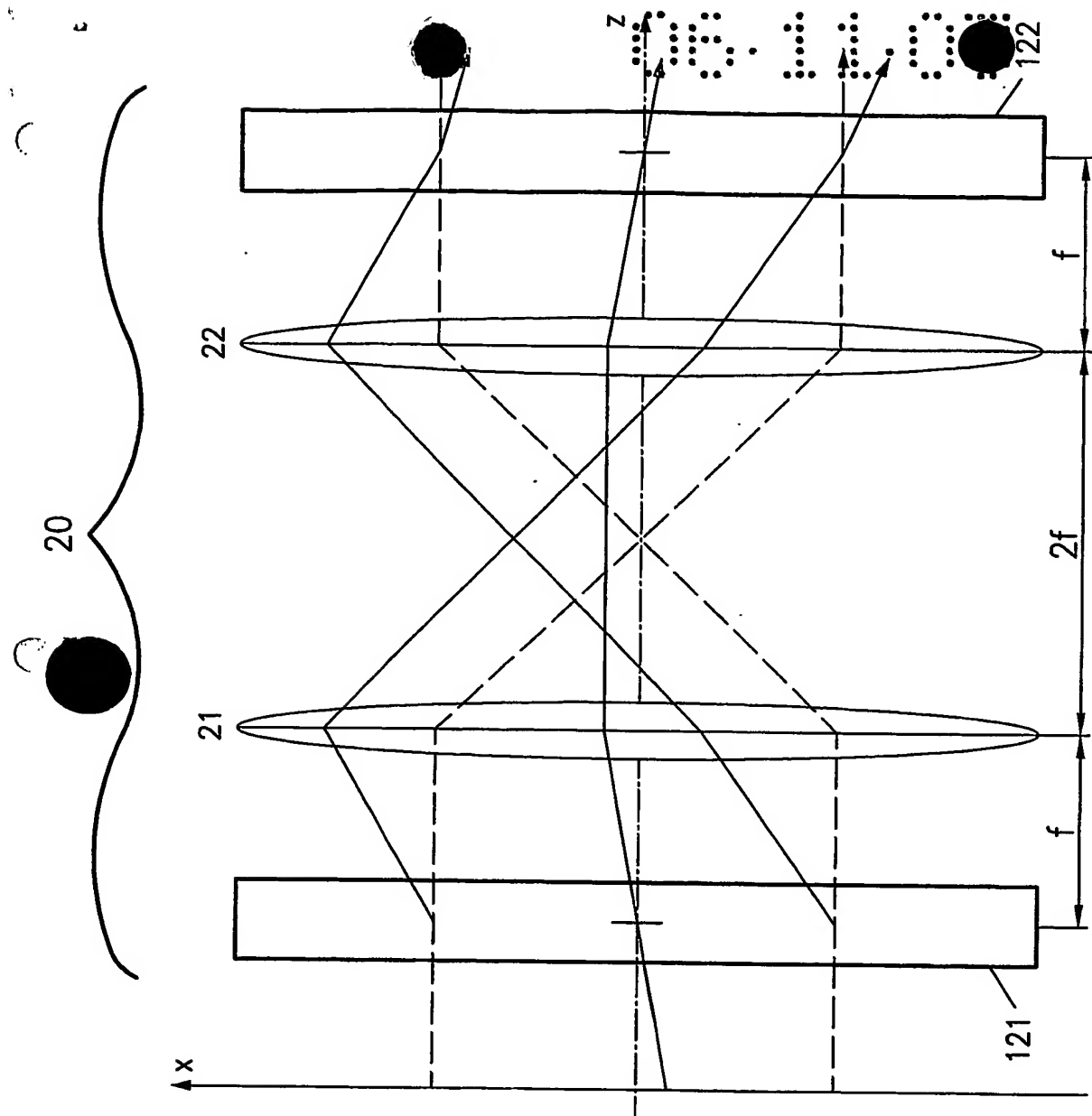


Fig.9b

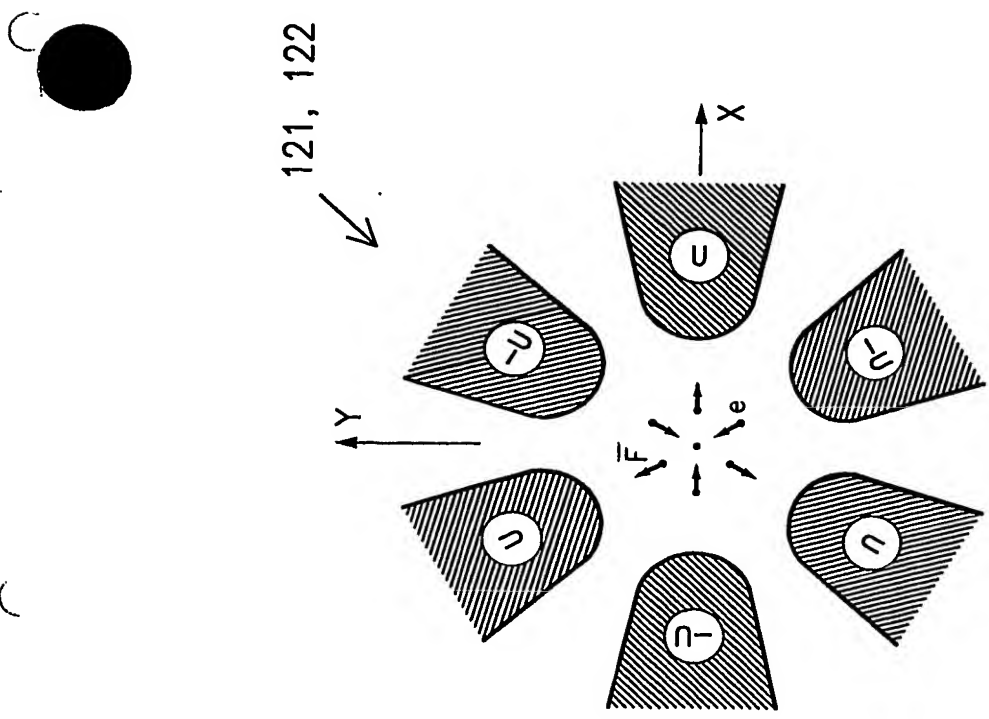


Fig.9a

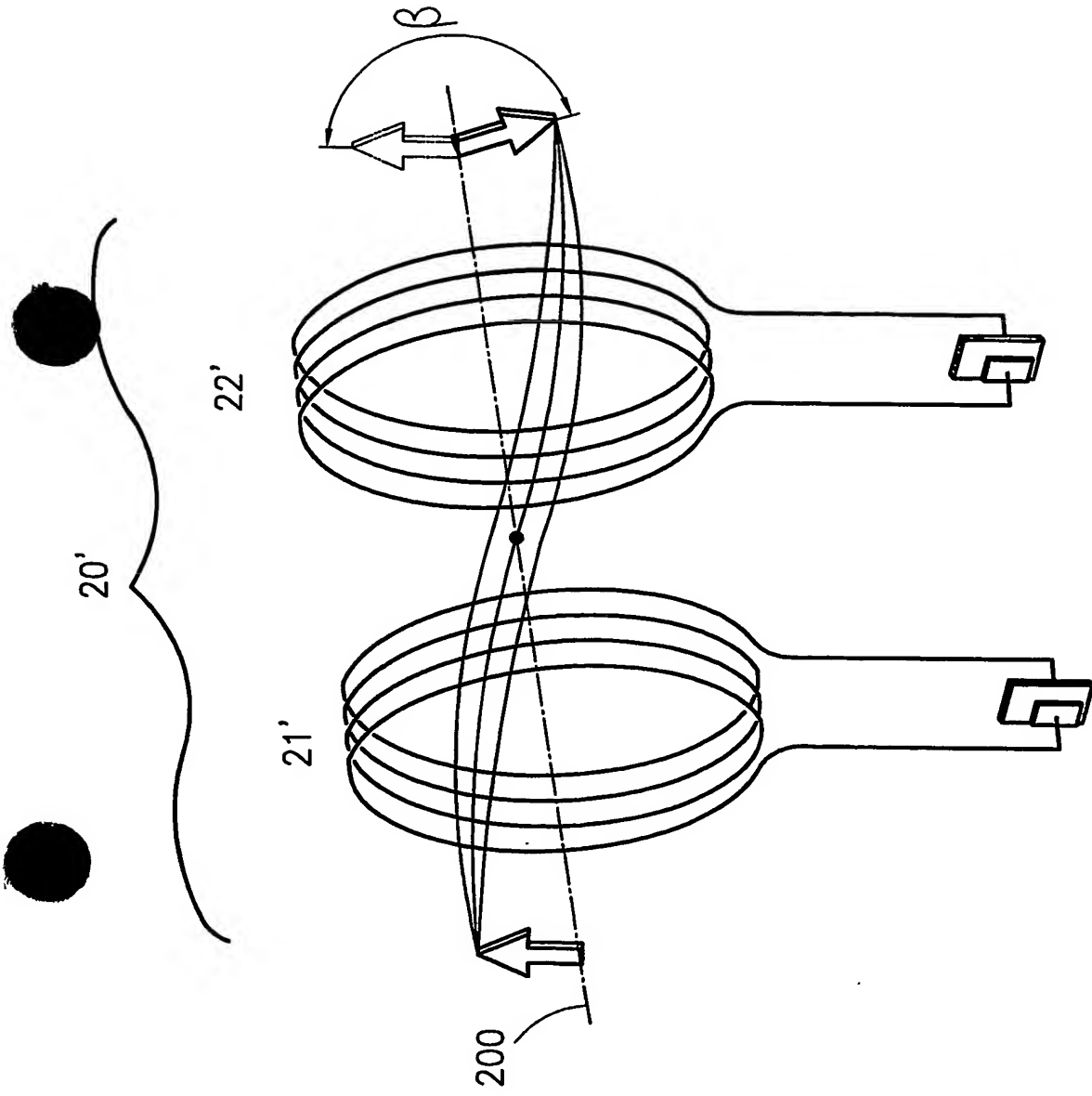


Fig.10